

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА

МАСЛОВСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР АНДРІЙОВИЧ

УДК 621.396.96

РАДІОЛОКАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ
СКЛАДНОЇ ФОРМИ НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАНЬ ВІДБИТТЯ ВІД ЛОКАЛЬНИХ
ДІЛЯНОК

01.04.03 – радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
фізико-математичних наук

Харків – 2020

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Колчигін Микола Миколайович,
Харківський національний університет імені
В.Н.Каразіна,
завідувач кафедри теоретичної радіофізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Нерух Олександр Георгійович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки,
завідувач кафедри вищої математики;

доктор фізико-математичних
наук, старший науковий співробітник
Миценко Ігор Михайлович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О. Я. Усикова,
старший науковий співробітник.

Захист відбудеться « 03 » квітня 20 20 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий « 21 » лютого 2020р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради _____ Ю.В.Аркуша
(підпис) (ініціали, прізвище)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Дисертаційну роботу присвячено дослідженню характеристик розсіювання електромагнітних хвиль на об'єктах складної геометричної форми, які розташовано на підстильній поверхні. Для розв'язання цієї задачі розвинуто методи розрахунку й вимірювання ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) об'єкту, а також методики врахування впливу підстильної поверхні. Досліджено способи зменшення амплітуди та перерозподілу відбитого від об'єкту сигналу з метою зниження радіолокаційної помітності такого об'єкта.

При сучасному рівні розвитку засобів радіолокаційного виявлення наземних об'єктів і засобів вогневого ураження, які оснащено радіолокаційною системою наведення, зниження радіолокаційної помітності озброєння та наземної техніки стає одним з основних методів збільшення терміну їх життя на полі бою.

Розробка заходів протидії радіолокаційному виявленню техніки та її захисту від зброї, що має радіолокаційні системи наведення, передбачає розв'язання задач оптимізації геометричної форми поверхні об'єктів та оптимального розміщення радіопоглинаючого матеріалу та покриття на їх поверхні.

Для розв'язання вказаних задач необхідно мати апіорні дані про характеристики розсіювання досліджуваних об'єктів. Такі дані можна отримати або за допомогою числового моделювання розсіювання електромагнітних хвиль на моделі досліджуваного об'єкту, або за допомогою експериментальних вимірювань для зразка досліджуваної техніки. Але наразі методи числового моделювання недостатньо розвинуто для ефективного розв'язання зазначеної задачі. А експериментальне отримання такої інформації пов'язано з необхідністю проведення великої кількості експериментів з виявлення радіолокаційних характеристик досліджуваних об'єктів та елементів їх поверхні. Проведення натурних експериментів у дальній зоні обмежено великою кількістю організаційних труднощів: використання спеціалізованого радіолокаційного полігону, залучення авіаційної техніки, тощо.

Отже складається **протиріччя**, яке обумовлене, з одного боку необхідністю вдосконалення методу радіолокаційного маскування об'єктів складної форми, а з іншого недостатньою ефективністю та складністю існуючих методів виявлення демаскуючих властивостей (елементів поверхні) об'єктів.

Розв'язання такого протиріччя можливе із застосуванням декомпозиційної методики вимірювання та розрахунку ЕПР об'єктів у ближній зоні, яку має бути зорієнтовано на реалізацію наступних підходів:

- врахування впливу підстильної поверхні на помітність наземного об'єкта;
- визначення ділянок поверхні об'єкта з найбільшим рівнем відбиття;
- визначення помітності радіолокаційного об'єкта на тлі підстильної поверхні.

Інформація про радіолокаційні характеристики як існуючих, так і проєктованих зразків наземної техніки, елементів та типів поверхонь інтенсивного розсіювання дозволить сформулювати практичні рекомендації, спрямовані на зниження їх радіолокаційної помітності. У ближній зоні антена радару має вузьку діаграму спрямованості, опромінює невелику ділянку поверхні об'єкта. Тому можливість

вимірювань у ближній зоні дозволяє виділити елементи та типи поверхонь досліджуваних об'єктів (існуючих та таких, що розробляються), які вносять найбільший внесок у вторинне випромінювання об'єкту, що є важливою практичною перевагою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі теоретичної радіофізики факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна відповідно до планів науково-дослідних робіт: «Методика розрахунку та вимірювань у ближній зоні характеристик радіолокаційної помітності для наземних об'єктів та ефективності її зниження при маскуванні» (номер державної реєстрації: 0116U000815 2016, здобувач – виконавець), «Методи та алгоритми розрахунку широкосмугових характеристик електромагнітного розсіяння на об'єктах складної форми для визначення їх радіолокаційної помітності.» (номер державної реєстрації: 0117U004965, здобувач – відповідальний виконавець).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є дослідження радіолокаційних характеристик наземних об'єктів складної форми, впливу підстильної поверхні на радіолокаційну помітність наземних об'єктів і розробка та вдосконалення методу вимірювання радіолокаційних характеристик наземних об'єктів складної форми у ближній зоні.

Задачі дослідження:

- Дослідження статистичних характеристик відбитого від об'єкту складної форми сигналу для визначення оптимальної кількості експериментальних вимірювань (або числових моделювань) для отримання достовірної інформації про радіолокаційні характеристики об'єкта;
- Розробка універсального методу врахування впливу підстильної поверхні на сумарний відбитий від об'єкту сигнал;
- Розвиток декомпозиційної методики визначення радіолокаційних характеристик об'єкту;
- Розвиток методу маскування наземного об'єкту складної форми із застосуванням декомпозиційної методики;
- Розвиток методу попередньої оцінки внеску заходів по зниженню радіолокаційної помітності об'єкту в загальний відбитий від об'єкту сигнал.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження у дисертаційній роботі є електромагнітне поле, що розсіюється об'єктом складної форми в ближній та дальній зонах.

Предмет дослідження. Предметом дослідження у роботі є вимірювання радіолокаційних характеристик поверхні складного наземного об'єкта в ближній зоні.

Методи дослідження. Метод падаючих та відбитих променів на основі методу фізичної оптики (від англ. Physical Optics - Shooting and Bouncing Rays PO-SBR) та декомпозиційна методика для вимірювання та розрахунку радіолокаційних характеристик наземних об'єктів. За допомогою методу PO-SBR реалізовано числове моделювання розсіяння електромагнітних хвиль на об'єкті складної форми. За допомогою декомпозиційної методики проводилися вимірювання та розрахунок радіолокаційних характеристик досліджуваного об'єкту.

Наукова новизна одержаних результатів.

- Вдосконалено метод числового моделювання розсіювання електромагнітних хвиль на наземному об'єкті, що полягає у представленні загального відбитого від радіолокаційної сцени поля у вигляді ряду за ступенями коефіцієнта відбиття підстильної поверхні;
- Розвинуто декомпозиційну методику натурного вимірювання ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) об'єктів складної форми. Порівняні дані натурних вимірювань для реального об'єкта з даними числового моделювання на 3D моделі цього об'єкта;
- Вперше для визначення ділянок поверхні об'єкта, що дають найбільший внесок у загальний відбитий від об'єкта сигнал запроваджено декомпозиційну методику;
- Вдосконалено методику зниження помітності наземного об'єкта в окремих кутових секторах за допомогою часткового покриття поверхні об'єкту радіопоглинаючим покриттям.
- Оптимізовано використання радіопоглинаючого матеріалу (РПМ) з метою максимального зменшення помітності об'єкту та мінімізації використання радіопоглинаючих матеріалів на поверхні об'єкту.

Практичне значення одержаних результатів. Дослідження, що наведені у дисертації, належать до основних наукових напрямів сучасної радіофізики й визначають тенденції її подальшого розвитку. Вони відносяться до задач розсіювання електромагнітних хвиль на об'єктах, що мають складну геометрію поверхні. Практичну значимість роботи підтверджують акти щодо використання та впровадження результатів науково-дослідної роботи. Такі акти здобувачем були отримані у Державному підприємстві «Конструкторське бюро «Південне»» при проведенні дослідно-конструкторської роботи «Гром-2», та у Державному підприємстві «Харківське конструкторське бюро з машинобудування імені О.О. Морозова».

Особистий внесок здобувача. У роботах [1], [11], [12], [9] та [2] автор проводив статистичну обробку результатів моделювання дифракції хвиль на об'єктах складної форми, розташованих на підстильній поверхні та проводив аналіз результатів. У роботах [3], [10], [4] автором було створено досліджувану 3D модель складної форми та проведено математичне моделювання розсіювання електромагнітних хвиль на досліджуваних об'єктах. У роботах [8], [5] автор запропонував ідею використання декомпозиційної методики для виявлення найбільш відбиваючих ділянок та провів математичне моделювання за допомогою декомпозиційної методики. У роботах [6], [14], [16] автор прийняв участь у проведенні натурних вимірювань радіолокаційних характеристик об'єкта декомпозиційною методикою та здійснював математичне моделювання. У роботах [7] автор прийняв участь у обговоренні концепції та в обробці даних числового моделювання. У роботах [13], [15] автор проводив математичне моделювання радіолокаційної помітності об'єкту, що знаходиться на підстильній поверхні. У роботах [17], [18], [19] автор створив 3D моделі, провів числові розрахунки та графічно оформив отримані результати.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації були представлені на міжнародних наукових конференціях: Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics YSC'2014 (Kharkiv, 2014) – автор отримав

винагороду за кращу доповідь в секції, International forum on applied physics YSF'2015 (Dnipropetrovsk, 2015), The 9th International Kharkov Symposium On Physics And Engineering Of Microwaves, Millimeter And Submillimeter Waves (Msmw'2016) (Kharkiv, 2016), Conference Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'2016) (Lviv, 2016), Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, (Odessa, 2016) – робота зайняла 2 місце у конкурсі робіт молодих вчених, **2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON (Kyiv, 2017)**, IEEE Microwave, Radar and Remote Sensing Symposium MRRS-2017 (Kyiv, 2017), 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (Odessa, 2018) – робота зайняла 3 місце у конкурсі робіт молодих учених.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури і 2 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 185 сторінок, з яких 139 сторінок основного тексту. Список використаної літератури на 14 сторінках включає в себе 131 найменування. Всього у дисертації 72 рисунка, 18 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано доцільність виконання досліджень та актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та визначено основні завдання для її досягнення. Представлено інформацію про об'єкт, предмет та методи досліджень, наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів. Висвітлено особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів роботи та публікації за темою дисертації.

Перший розділ «Аналіз існуючих методів оцінки радіолокаційної помітності наземної техніки» є оглядовим. У ньому проаналізовано існуючі методи отримання даних щодо радіолокаційної помітності об'єктів складної форми. Розглянуто методи вимірювання параметрів полів, що розсіяні реальними зразками техніки на полігонах (натурний експеримент) та методи вимірювання параметрів полів, що розсіяні макетами реальних об'єктів у безлунних камерах (фізичний експеримент). Розглянуто пристрої, що використовуються для вимірювання ЕПР об'єктів. Також розглянуто принцип роботи та склад комплексу малогабаритних вимірників коефіцієнтів відбиття (МВКВ), що використані для вимірювання коефіцієнту відбиття в ближній зоні від об'єкта, що розглядається у Розділі 3. Також у Розділі 1 наведено огляд теоретичних методів розрахунку ЕПР об'єктів. Розглянуто прямі та непрямі методи розрахунку, методи точного та наближеного розв'язання дифракційних рівнянь. На підставі проведеного аналізу зроблено висновки, обґрунтовано мету дисертаційної роботи та завдання дослідження.

У другому розділі «Методика для розрахунку характеристик радіолокаційної помітності складних об'єктів розташованих на різних типах підстильної поверхні» представлено детальний опис процесу створення 3-D моделі об'єкта складної форми. Обґрунтовано необхідність створення моделей об'єктів для проведення числових розрахунків коефіцієнта відбиття. Крок за кроком проілюстровано процес створення моделі. Першим кроком для отримання будь якої моделі є створення для неї спеціальної оболонки – так званої «студії», яка демонструє вигляд об'єкта у всіх проекціях. Для простих моделей може бути достатньо кількох проекцій, особливо

якщо модель є симетричною відносно якоїсь вісі (точки). Якщо модель складна і кожна проекція має особливі елементи, для створення студії потрібні всі шість проекцій.

Далі наведено методику розрахунку діаграми зворотного розсіяння (ДЗР) складних об'єктів, що розташовані на різних типах підстильних поверхонь. При цьому беруться до уваги два механізми взаємодії електромагнітних хвиль з підстильною поверхнею:

- зворотне розсіювання, зумовлене дифузним розсіянням на нерівностях поверхні. Воно створює «фоновий» сигнал. Даний параметр не включено в розрахунок ДЗР об'єкта, але він враховується при подальшій обробці даних;
- дзеркальне відбиття, яке впливає на зворотне розсіяння від об'єкту через перевідбиття променів між підстильною поверхнею і об'єктом.

Перший параметр описується питомою ЕПР зворотного розсіяння поверхні σ_{spec} [dB]. Другий параметр може бути визначено трьома різними способами:

- за допомогою ефективної діелектричної проникності ε (і/або магнітної проникності μ) напівпростору, на якому розташовано об'єкт;
- за допомогою коефіцієнта відбиття підстильної поверхні для заданого кута падіння і поляризації, що може бути пов'язаний з ефективними проникностями за формулами Френеля;
- за допомогою поверхневого імпедансу Z_s , який для заданого кута падіння хвилі створює таке ж відбиття як й інші дві методики.

Щоб мати можливість аналізувати ДЗР для широкого спектру підстильних поверхонь з різними властивостями, а також для того, щоб отримати можливість аналізуючи ДЗР виявляти конструктивні особливості об'єкта, що найбільш сильно впливають на його помітність, запропоновано метод, заснований на розкладанні поля. Відповідно до даного методу розсіяне поле можна розділити на наступні компоненти:

- а) промені, відбиті від об'єкту назад до радару;
- б) промені, які падають на об'єкт, відбиваються на підстильну поверхню і потім перевідбиваються від підстильної поверхні назад до радару;
- в) промені, які падають на підстильну поверхню, відбиваються до об'єкту і потім перевідбиваються від нього до радару;
- г) промені, які падають на підстильну поверхню, відбиваються до об'єкту, перевідбиваються від нього до підстильної поверхні і потім перевідбиваються від неї до радару.

Відбите поле E_0 (Рис.1) створюється променями (а), які не взаємодіють з підстильною поверхнею і, таким чином, не залежать від її коефіцієнта відбиття R . Відбите поле E_1 створюється променями (б) і (в), що взаємодіють з підстильною поверхнею тільки один раз, й тому є пропорційним до R . Компонента поля E_2 створюється променями (г), які взаємодіють з підстильною поверхнею двічі й тому – пропорційні R^2 . Рис. 1 схематично показує описані вище випадки.

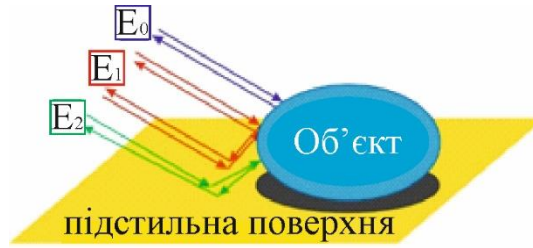


Рис. 1 - Об'єкт на підстильній поверхні

Таким чином, нехтуючи подальшими багаторазовими перевідбиттями між об'єктом і землею, ми можемо припустити, що відбите поле можна представити у вигляді ряду по ступеням коефіцієнта відбиття підстильної поверхні:

$$\vec{E}(R) = \vec{E}_0 + \vec{E}_1 R + \vec{E}_2 R^2 + \dots \quad (1)$$

Подальшим залишком ряду в (1) ми нехтуємо. Хоча ряд можна продовжувати досить довго, для достатнього рівня точності розрахунку досить й перших трьох додатків.

Оскільки передбачається, що підстильна поверхня є нескінченною площиною, внесок у відбите поле буде тільки від променів, відбитих від поверхні під кутами, що відповідають позиції радіолокаційної станції (РЛС). Таким чином, коефіцієнт відбиття буде залежати від кута падіння хвилі.

Далі проводиться моделювання дифракції електромагнітних хвиль на досліджуваному об'єкті для трьох випадків: коли об'єкт знаходиться у вільному просторі без підстильної поверхні ($R = 0$), результатом чого буде комплексна амплітуда розсіяного поля E_A ; коли об'єкт розташовано на ідеальній електропровідній поверхні ($R = -1$), результатом чого буде комплексна амплітуда розсіяного поля E_M ; та коли об'єкт розташовано на ідеальній магнітопровідній поверхні ($R = 1$), результатом чого буде комплексна амплітуда розсіяного поля E_∞ .

В результаті такого моделювання з використанням вищеописаних трьох компонент поля E_0 , E_1 та E_2 можна отримати наступні рівняння:

$$\begin{array}{ll} \text{Free space, } R = 0 & : \vec{E}_A = \vec{E}_0, \\ \text{PEC, } R = -1 & : \vec{E}_M = \vec{E}_0 - \vec{E}_1 + \vec{E}_2, \\ \text{PMC, } R = 1 & : \vec{E}_\infty = \vec{E}_0 - \vec{E}_1 + \vec{E}_2. \end{array} \quad (2)$$

Із отриманих трьох рівнянь можна знайти компоненти поля \vec{E}_0 , \vec{E}_1 , і \vec{E}_2 у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \vec{E}_0 &= \vec{E}_A, \\ \vec{E}_1 &= 0.5(\vec{E}_\infty - \vec{E}_M), \\ \vec{E}_2 &= 0.5(\vec{E}_\infty + \vec{E}_M) - \vec{E}_A. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким чином, після трьох моделювань ми отримуємо результати, які дозволяють знайти ДЗР для будь якої підстильної поверхні з відомим коефіцієнтом відбиття R по формулі (1).

Для складних радіолокаційних цілей ЕПР є складною непередбачуваною функцією кутів падіння $\sigma = \sigma(\theta, \varphi)$. У реальних обставинах радар може бачити об'єкт під різними, непередбачуваними кутами, отже ЕПР об'єкта є випадковою

функцією кутів θ та φ . Таким чином, для оцінки радіолокаційної помітності об'єкта має сенс використовувати статистичних методів обробки ЕПР.

У розділі приведено дослідження стосовно вимог до густини кутової сітки, на якій слід визначати ЕПР, щоб отримати достовірну оцінку статистичних характеристик об'єкту. На базі статистичної обробки даних діаграм зворотного розсіяння для трьох моделей об'єктів зроблено висновок про оптимальну щільність сітки ДЗР. Зроблено висновок, що вибір кутової сітки з кроком 3° при розрахунку ДЗР дає достовірні дані про радіолокаційну помітність об'єкта. При цьому такий крок дає можливість заощадити час, необхідний для розрахунку ДЗР об'єкту.

У останньому підрозділі запропоновано методику оцінки помітності об'єкта, що дозволяє абстрагуватися від конкретного рівня фоновому сигналу. Розраховано залежність вірогідності пеленгування об'єкту радаром від роздільної здатності радару. Наведено залежність вірогідності пеленгування від питомої ЕПР фону для відомої роздільної здатності радару. Продемонстровано зниження вірогідності пеленгування об'єкту за допомогою накидки з радіопоглинаючого матеріалу. Виділено основні параметри помітності об'єкта: питома ЕПР об'єкту; напіврозкид питомої ЕПР об'єкту («відстань» між ймовірностями виявлення 0% та 50%); ефективна видима площа об'єкту.

Отже, запропонована методика розрахунку помітності об'єкта дозволяє абстрагуватися від конкретного рівня фоновому сигналу та отримати характеристики об'єкту – питому ЕПР, ефективний розмір й розкид питомої ЕПР, які дозволяють наближено обчислити вірогідність виявлення об'єкта в умовах довільного рівня відбиття від фону й для довільної роздільної здатності радару.

Проведені у розділі дослідження для наземних та повітряних цілей дають змогу на основі розрахунків ЕПР з великим кутовим кроком зробити висновки щодо середнього значення ЕПР для об'єкту та визначити довірчі інтервали, в яких буде знаходитися це середнє значення із заданою ймовірністю.

Зокрема, можна зробити висновок, що задля отримання відносної похибки не більшої за $\sim 20\%$ для кожної із проаналізованих вище моделей, слід обрати кутовий крок не більший за 3° . Задля уникнення інших похибок, розрахунок слід провести декілька разів із новими вибірками.

Досліджено можливості простого характеризування помітності об'єкту складної форми та порівняння помітностей різних об'єктів або початкової моделі об'єкту та моделі із запропонованими для зменшення помітності змінами. Визначено співвідношення між питомою ЕПР фону, роздільною здатністю радару та ймовірністю пеленгування об'єкту. Введено поняття питомої ЕПР об'єкту, що дає змогу порівнювати помітності різних об'єктів. Також безпосереднє порівняння питомої ЕПР об'єкту з питомою ЕПР фону дозволяє відразу зробити висновок щодо помітності об'єкта на такому тлі із використанням досить хороших засобів розвідки (із роздільною здатністю, меншою за розмір об'єкта).

У третьому розділі «Декомпозиційна методика вимірювання ЕПР» описано декомпозиційну методику вимірювання ЕПР об'єкту складної форми у ближній зоні. Наведено результати числового моделювання та натурних вимірювань ЕПР об'єкта

декомпозиційною методикою. Результати числових розрахунків порівнюються з результатами натурних вимірювань.

Метод натурних вимірювань ЕПР засновано на випромінюванні зондуючого сигналу й вимірюванні потужності прийнятого відбитого від об'єкта сигналу. ЕПР визначається в дальній зоні, де розсіяна об'єктом хвиля є плоскою хвилею (така ж вимога має задовольнятися й для антени – об'єкт повинен розташовуватися в дальній зоні антени).

Недоліком такого методу є те, що вимірювання ЕПР об'єкта в дальній зоні є складним завданням та часто складно реалізується на практиці за певних співвідношень між розмірами об'єкта та робочою довжиною хвилі радара/РЛС, через неможливість забезпечення необхідної (часто дуже великої) відстані від об'єкта/розсіювача до РЛС.

В даній роботі пропонується вдосконалення способу вимірювання ефективної поверхні розсіювання об'єкта в ближній зоні. Декомпозиційна методика може бути використана для вимірювання моностатичної ефективної площі розсіювання (ЕПР) об'єктів як на відкритих полігонах, так і в закритих приміщеннях в лабораторних та виробничих умовах. Так само, методика може бути використана для виявлення найбільш радіолокаційно помітних фрагментів великогабаритного об'єкта, що вносять визначальний, максимальний внесок у сумарну/загальну ЕПР даного об'єкта.

Запропонована методика підходить для вимірювання ЕПР об'єкта будь-якої складної форми і передбачає проведення вимірювань в ближній зоні об'єкта. Це приводить до того, що хвиля, яка падає на об'єкт, не є плоскою - її хвильовий фронт має колоколоподібну форму з центром, що збігається з центром освітленої частини об'єкта (центром висвітленої «плями» на об'єкті). При вимірах сусідні «плями» будуть частково накладатися одна на іншу, що приведе до компенсації впливу неоднорідностей амплітудного розподілу на результати вимірювань. Пропонується переміщувати вимірювальний прилад таким чином, щоб освітлювані плями на об'єкті стикалися за рівнем половинної потужності.

За рахунок проведення вимірювань в ближній зоні можна розширити технічні можливості вимірювання ЕПР великогабаритних об'єктів. Вимірювання можна проводити, як в польових, так і лабораторних умовах, при цьому не тільки в горизонтальній площині, а й під різними азимутальними кутами й кутами місця.

Для прикладу числові розрахунки декомпозиційною методикою проводились на довжині хвилі 10 см, поляризація - горизонтальна, напрямок візування об'єкта радаром: кут місця $\theta = 0^\circ$ (у горизонтальній площині) і азимутальний кут $\varphi = 45^\circ$. Досліджуваний об'єкт (модель танка Т-90) складається з ідеально провідного матеріалу. Розглянуто проекцію об'єкта на площину, перпендикулярну напрямку огляду. Розміри проекції 7730 мм X 2730 мм. Для того, щоб застосувати методику, розділяємо об'єкт на фрагменти розмірами: ширина 400 мм, висота 300 мм. Таким чином, об'єкт розділено на 113 окремих елементів, ще 67 виявились фрагментів порожніми. Середню ЕПР об'єкту отримано за допомогою некогерентного сумування, вона дорівнює $\bar{\sigma} = 9.96 \text{ м}^2$. Слід звернути увагу на те, що деякі елементи об'єкту не є пустими, але дають дуже невеликий внесок в повну ЕПР об'єкту (B9, B10, D1, D7, D8, D14, E1, E15, E16, E18, E19, E20, F19, F20, H1, H18, I2, I17).

Також слід відзначити, що декомпозиційна методика дає можливість виявити ділянки поверхні об'єкта, що дають найбільший внесок в загальний відбитий від об'єкта сигнал. Розглядаючи цю можливість з боку радіолокації, стає очевидним, що використання декомпозиційної методи дозволяє виявити найбільш демаскуючі елементи поверхні об'єкту (Рис. 2) та застосувати заходи по зменшенню відбитого сигналу саме до них. Маскування об'єкта таким чином дасть можливість мінімізувати використання радіопоглинаючого матеріалу.

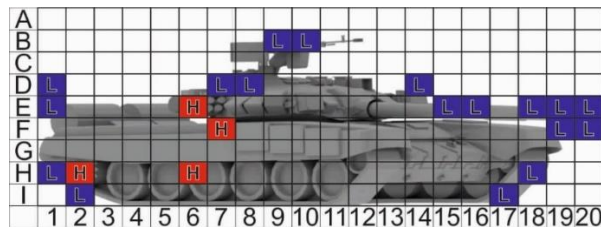


Рис. 2 - Фрагменти досліджуваного об'єкту з найбільшим та найменшим рівнем відбиття.

Для перевірки точності виявлення найбільш відбиваючих ділянок поверхні об'єкта декомпозиційною методикою було проведено порівняння результатів натурних вимірювань з результатами числового моделювання. В якості досліджуваного об'єкта було обрано тактичну колісну броньовану машину (ТБKM) (Рис. 3).



Рис. 3. Досліджуваний об'єкт і його 3D модель.

ТБKM має складну форму поверхні й великі, у порівнянні з довжиною хвилі, розміри (висота – 2,3 м, ширина – 2,5 м, довжина – 5,4 м). Для використання декомпозиційної методики поверхню об'єкта було поділено на ділянки розміром 500x500 мм. Об'єкт вивчався окремо з чотирьох напрямків візування: у напрямку на правий і лівий борта (для цього напрямку поверхню було розбито на 26 ділянок) та у напрямку на ніс і корму (для цього напрямку поверхню було розбито на 12 ділянок). Кут місця при цьому дорівнював нулю. Зондування проводилося для двох довжин хвиль: $\lambda=3$ см та $\lambda=8$ мм. Для вимірювання ЕПР об'єкта декомпозиційною методикою було виготовлено переносний пристрій для вимірювання коефіцієнта відбиття. Такий однопозиційний прилад може також застосовуватися і при вимірах коефіцієнта відбиття від м'яких покриттів, що мають не плоску форму. На Рис. 4 представлена структурна схема переносного пристрою для вимірювання коефіцієнта відбиття.

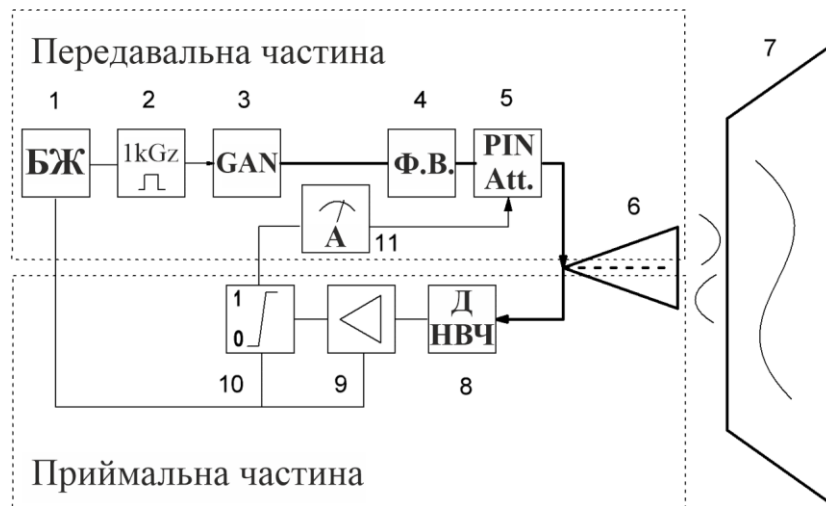


Рис. 4 - Структурна схема пристрою.

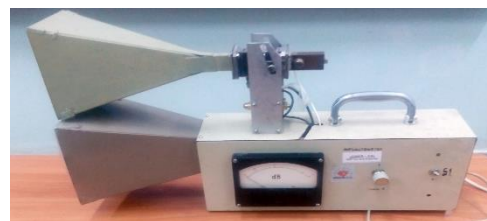
До складу переносного пристрою для вимірювання коефіцієнта відбиття входять: блок 1 живлення, модулятор 2, генератор 3 на діоді Ганна, вентиль 4 феритовий, Р-і-п атенюатор 5 НВЧ, поєднана приймально-передавальна антена 6 рупорного типу, досліджуваний об'єкт «мішень» 7, детектор НВЧ 8 приймача, підсилювач 9 низької частоти, компаратор 10, індикатор 11 коефіцієнта відбиття/поглинання/проходження електромагнітної хвилі від/через «мішені» згідно корисної моделі, що антена виконана у вигляді поєднаної рупорної приймально-передавальної антени.

Наземний спосіб вимірювання характеристик відбитого поля із застосуванням МВКВ може бути реалізований в безпосередній близькості від об'єкту, так як МВКВ мають значно меншу апертуру, ніж РЛС і, отже, меншу відстань, відповідно до умови дальньої зони. Вимірювання коефіцієнтів відбиття проводяться в польових умовах від ділянок поверхні, визначених у результаті декомпозиції об'єкта або зразка техніки.

Вимірювання характеристик радіолокаційного відбиття від зразків техніки в польових умовах проводяться за допомогою МВКВ (Рис. 5), розроблених на кафедрі теоретичної радіофізики Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Їх характеристики наведено в Таблиці 1.



а



б

Рис. 5 - ПВКВ міліметрового (а) та сантиметрового (б) діапазонів.

Таблиця 1.

Технічні характеристики приладів ПВКВ

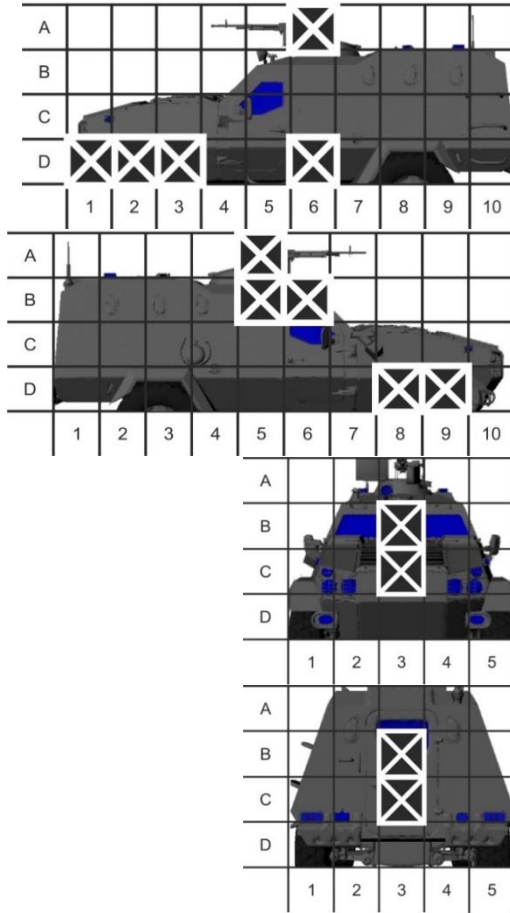
Робоча частота, ГГц		35,4	10.00
Випромінювана потужність, мВт		15	200
Динамічний діапазон, дБ		40	30
Рівень розв'язки між передавальною та приймальною антенами, дБ		64,3	64
Похибка вимірювань, дБ		2,5	1,5
Діапазон допустимих відстаней, м		0,5-4	2-8
Ширина діаграми спрямованості на рівні 0,7 по напрузі		7,5°±0,25°	
Ширина діаграми спрямованості на рівні 0,1 по напрузі		12°	28°
Розмір області опромінення на поверхні об'єкта при відстанях до нього:	1 м	0.2	
	м	0,675	1,5
	м	0,8	2,0
	,6 м	1	2,29
Споживана потужність, Вт		15	10
Напруга живлення, В		11-13	13-14
Вага, кг		4	4,5

За допомогою натурних вимірювань та математичного моделювання було отримано дані про рівень відбиття ділянок поверхні для чотирьох напрямків візування. Для кожного з напрямків порівнювалося розташування 20% найбільш відбиваючих ділянок поверхні об'єкта та його моделі.

Результати порівняння показали, що 75% найбільш відбиваючих ділянок моделі й об'єкта співпадають, або їх розташування є близьким. Невеликі розбіжності в розташуванні таких ділянок можуть бути пояснені похибкою при переносі центрів ділянок з об'єкта на модель.

Таким чином результати порівняння показують, що числове моделювання розсіювання електромагнітних хвиль на об'єкті складної форми декомпозиційною методикою дає досить точні дані щодо розташування найбільш відбиваючих ділянок на поверхні об'єкту. Це може бути основою для подальшої розробки методики зниження кількості використовуваного радіопоглинаючого матеріалу для маскуванню об'єктів складної форми.

Числове моделювання



Натурні вимірювання

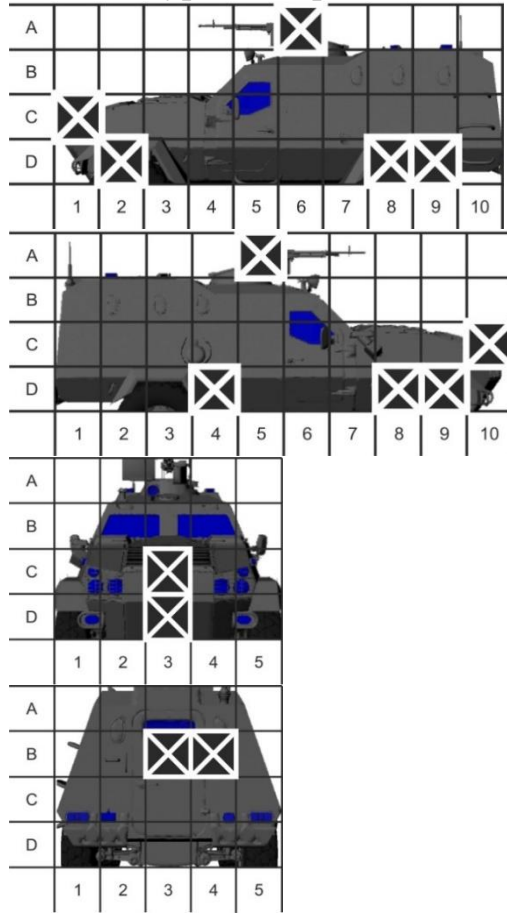
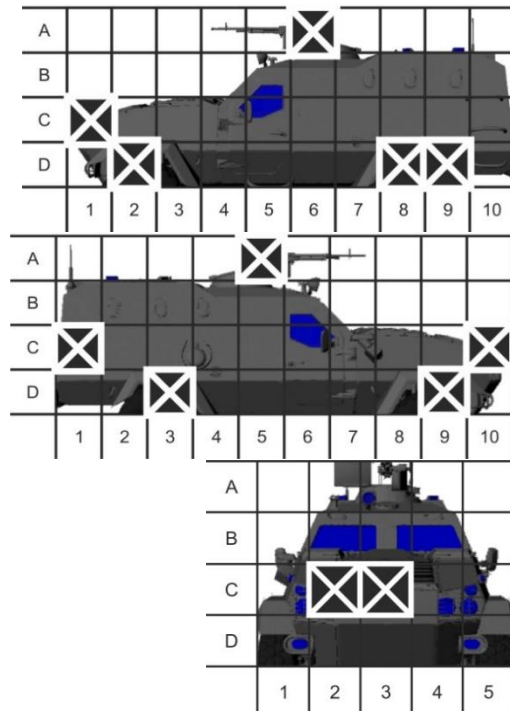
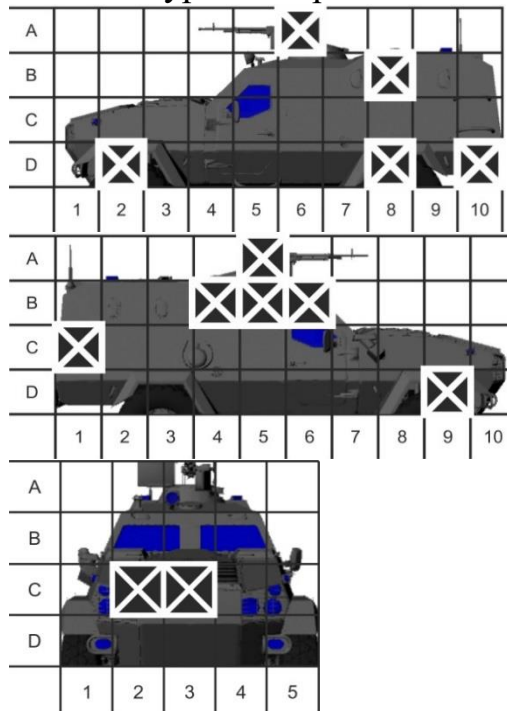


Рис. 6. Розташування найбільш відбиваючих ділянок поверхні досліджуваного об'єкту, що були виявлені протягом числового моделювання та натурних вимірювань для $\lambda=3$ см.

Числове моделювання



Натурні вимірювання



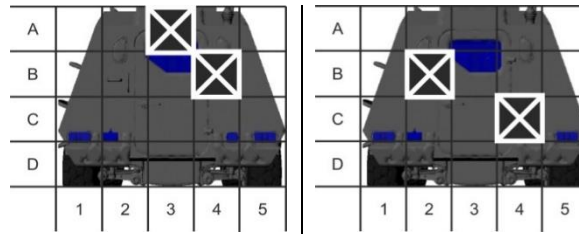


Рис. 7. Розташування найбільш відбиваючих ділянок поверхні досліджуваного об'єкту, що були виявлені протягом числового моделювання та натурних вимірювань для $\lambda=8$ мм.

Четвертий розділ «Методи радіолокаційного маскування наземних об'єктів складної форми» присвячено методам зниження ефективної поверхні розсіювання об'єкта та зниженню контрастності об'єкта на тлі підстильної поверхні.

Як відомо, одним із найбільш ефективних методів радіолокаційного маскування об'єкту (зменшення його ЕПР) є використання РПМ. Однак, для маскування усієї поверхні об'єкту необхідна велика кількість такого матеріалу й такі заходи можуть негативно впливати на функціонування різних систем укритого об'єкта. Також слід зазначити, що більшість маскуючих тентів можуть бути застосовані лише для нерухомого об'єкта.

Описана вище декомпозиційна методика дозволяє виявити елементи об'єкта, які вносять найбільший внесок в розсіяне поле («яскраві ділянки») і маскувати саме їх.

Для перевірки впливу застосування РПМ на найбільш яскравих ділянках на загальну радіолокаційну помітність об'єкта, було проведено числове моделювання за допомогою декомпозиційної методики. Результати моделювання представлено на Рис. 8 у м². На рисунку виділено ділянки, ЕПР яких перевищує 600 м². Для імітації застосування РПМ на цих ділянках їх ЕПР зменшено в 10 разів.

«Замаскованими» таким чином виявляються елементи E6, E10, E13, E15, E17, D10, D11, D12, D13, D14, D15.

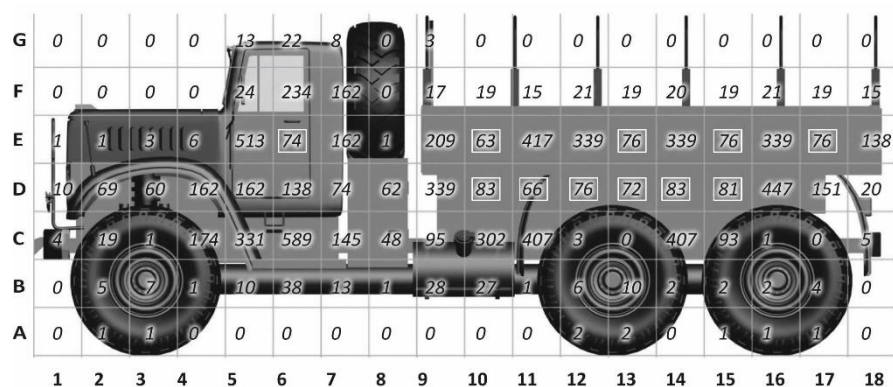


Рис. 8. Значення ЕПР для кожного елемента у випадку, коли ЕПР для деяких елементів зменшено в 10 разів (ці елементи виділено).

Тепер розрахуємо середню ЕПР для повного об'єкта для описаного вище випадку за допомогою формули (4):

$$\bar{\sigma} = \sum_i \bar{\sigma}_i \quad (4)$$

Вона виявляється рівною $\bar{\sigma}_c = 8434 \text{ м}^2$. Таким чином, зменшення ЕПР для найбільш відбиваючих елементів приводить до зменшення середньої ЕПР об'єкта з 15875 м^2 до 8434 м^2 (на 47%). Тобто зменшення ЕПР для найбільш помітних елементів об'єкта (укриття їх радіопоглинаючим матеріалом) приводить до суттєвого зменшення середнього ЕПР всього об'єкта.

Далі можна отримати залежність зменшення ЕПР від ділянки площі об'єкта, накритої радіопоглинаючим матеріалом (фактично від кількості елементів, для яких зменшується значення ЕПР). Цю залежність представлено на Рис. 9. На цьому рисунку видно, що укриття приблизно 10% площі об'єкта за допомогою РПМ з коефіцієнтом відбиття $R = -10 \text{ дБ}$ приводить до зменшення ЕПР в 2 рази, а укриття 20% площі об'єкта - до зменшення ЕПР в 5 разів. Таким чином, можна зробити висновок, що найбільший внесок в ЕПР об'єкта дає невелика кількість елементів з найбільшим рівнем відбиття і для ефективного зменшення ЕПР всього об'єкта має сенс маскувати за допомогою РПМ саме ці елементи.

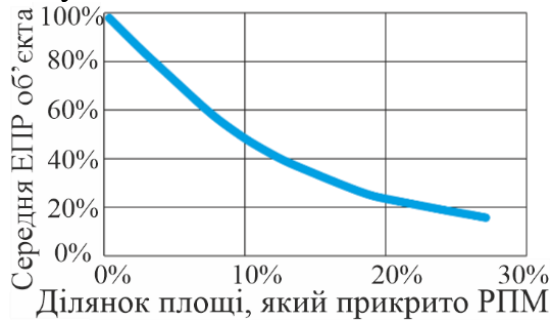


Рис. 9 Залежність зменшення середньої ЕПР об'єкта від ділянки площі, яка маскується РПМ з $R = -10 \text{ дБ}$.

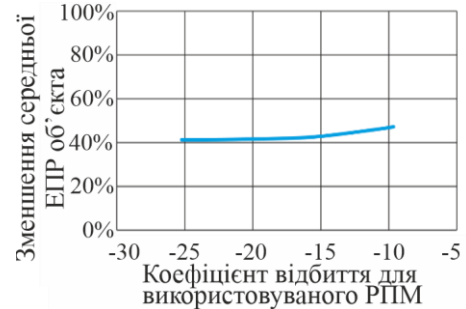


Рис. 10 Залежність величини зменшення середньої ЕПР об'єкта від коефіцієнта відбиття використаного РПМ у випадку, якщо маскується 10% площі об'єкта.

Також можна отримати залежність зменшення середньої ЕПР об'єкта від величини, на яку зменшується ЕПР кожного елемента (фактично від якості радіопоглинаючого матеріалу), цю залежність представлено на Рис. 10. З цього рисунка видно, що якість РПМ не суттєво впливає на зменшення ЕПР. Це може пояснюватися тим, що після зменшення ЕПР для деякої кількості найбільш яскравих елементів, основний внесок в середню ЕПР дає відбиття від інших елементів.

На Рис. 11 представлено графік залежності зниження середньої ЕПР досліджуваного об'єкта від коефіцієнта відбиття використовуваного РПМ (в дБ) і площі поверхні об'єкта, яка прикрита РПМ. Слід відзначити, що ділянки об'єкта, що прикриваються, вибиралися не довільно, а в порядку зменшення їх рівня відбиття. Від найбільш помітного елемента до найменш помітного. З даного графіка можна зробити висновок, що маскування приблизно 20% найбільш відбиваючих елементів дає можливість досягти помітного зниження середньої ЕПР об'єкта (близько -70%), навіть при використанні покриття з невеликим зниженням відбиття (в даному випадку -10 дБ).

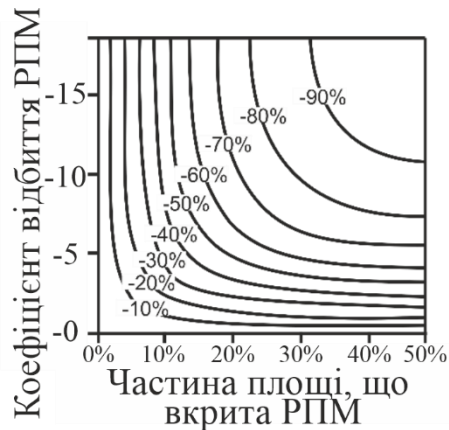


Рис. 11 Графік залежності зниження середньої ЕПР (в дБ) від коефіцієнта відбиття використаного РПМ (в дБ) і кількості ділянок поверхні об'єкта, які прикриті РПМ.

Однак у реальних умовах завдання зниження помітності наземного об'єкта є більш складним завданням через наявність підстильної поверхні. В таких умовах задача повинна бути переформульована. Для зниження радіолокаційної помітності наземного об'єкта необхідно знизити не тільки його ЕПР, а й контрастність на тлі підстильної поверхні.

Як приклад розглянемо спрощену модель танка. Довжина моделі (зі стволом) 16,41 м, довжина корпусу танка 14,93 м, ширина танка 6,62 м, висота 2,58 м.

При всіх подальших розгляданнях кут місця зондування дорівнює 10 градусам від горизонту, що відповідає куту зондування наземних об'єктів з висоти польоту вертолітної техніки.

В якості підстильної поверхні було обрано:

– бетон, відносна діелектрична проникність $\varepsilon = 6.5 + j1.5$, середньоквадратичне відхилення висоти нерівностей поверхні $\sigma = 0.00015$ м.

– степ (суглинок, луг, трава), відносна діелектрична проникність $\varepsilon = 3 + j0.4$, середньоквадратичне відхилення висоти нерівностей поверхні $\sigma = 0.05$ м.

Для обох досліджених поверхонь відносна магнітна проникність дорівнює одиниці.

Для зниження контрасту моделі танка на тлі підстильної поверхні будемо частково або повністю покривати танк радіопоглинаючим матеріалом (РПМ) так, щоб його ЕПР із заданого напрямку була якомога ближче до ЕПР ділянки підстильної поверхні, яку танк затінює при опроміненні з цього ракурсу.

ЕПР досліджуваного об'єкта розраховувалася при частоті зондуючого сигналу 10 ГГц. При розрахунках використано РПМ товщиною 1.3 мм з параметрами $\varepsilon_1 = 20 + i0.1$, $\mu_1 = 1.35 + i0.8$. Даний матеріал забезпечує зниження ЕПР для плоскої пластини до 15 дБ при нормальному падінні для зондуючого сигналу з вказаною частотою.

Для оцінки ЕПР моделі поверхню об'єкта було розділено на 141 частину. При цьому були отримані оцінки ЕПР цих частин в разі ідеально провідної поверхні і використання РПМ. Комбінуючи покриття РПМ окремих ділянок, будемо домагатися

середнього значення ЕПР в деякому діапазоні азимутів зондування, максимально близького до середнього значення ЕПР ділянки підстильної поверхні, яку затінює модель танка в тому ж діапазоні азимутів зондування.

Досліджено наступні діапазони азимутів зондування моделі танка: при зондуванні зпереду діапазони азимутів $-5^\circ \dots +5^\circ$ та $-10^\circ \dots +10^\circ$, при зондуванні збоку діапазони азимутів $+40^\circ \dots +50^\circ$ та $+35^\circ \dots +55^\circ$. Значення ЕПР, отримані в результаті дослідження, наведено в табл. 2. Отримані числові дані представлено в квадратних метрах.

У таблиці використано наступні позначення: σ_g – ЕПР затіненої танком ділянки підстильної поверхні; σ_{abs} – ЕПР танка, повністю покритого РПМ; σ_{pc} – ЕПР ідеально провідного танка; σ_{opt} – ЕПР танка, покритого РПМ оптимальним чином, за допомогою описаної вище процедури.

Таблиця 2

Результати розрахунків ЕПР

Діапазон азимутів зондування	Параметр	Горизонтальна поляризація		Вертикальна поляризація	
		Бетон	Степ	Бетон	Степ
$-5^\circ \dots +5^\circ$	σ_g	4.886E-03	1.2274	4.886E-02	1.2274
	σ_{abs}	0.5745	0.1927	0.2326	0.1924
	σ_{pc}	16.5733	5.869444	7.3317	6.0018
	σ_{opt}	0.5766	1.5089	0.2345	1.5146
$-10^\circ \dots +10^\circ$	σ_g	5.054E-03	1.2696	5.054E-02	1.2696
	σ_{abs}	0.4468	0.1573	0.1838	0.1516
	σ_{pc}	12.8057	4.6764	5.8111	4.7938
	σ_{opt}	0.4487	1.3265	0.18545	1.3236
$+40^\circ \dots +50^\circ$	σ_g	9.044E-03	2.2717	9.044E-02	2.2717
	σ_{abs}	0.1406	8.732E-02	9.308E-02	8.673E-02
	σ_{pc}	3.4512	2.7157	3.3128	3.2195
	σ_{opt}	0.1510	2.3607	9.994E-02	2.8747
$+35^\circ \dots +55^\circ$	σ_g	9.008E-03	2.2627	9.008E-02	2.2627
	σ_{abs}	0.1173	6.887E-02	7.175E-02	6.596E-02
	σ_{pc}	2.6824	2.0692	2.5671	2.4874
	σ_{opt}	0.1303	2.0692	9.789E-02	2.2693

Аналіз даних, наведених в табл. 2, показує, що степ як підстильна поверхня має помітний рівень зворотного розсіювання. Тому в результаті досліджень вдалося за допомогою РПМ покрити модель танка таким чином, щоб знизити контраст (відношення ЕПР танка до ЕПР затіненої ділянки підстильної поверхні) до значень, близьких до одиниці. Бетон в якості підстильної поверхні має низький рівень зворотного розсіювання. У зв'язку з цим значення ЕПР ділянки бетону, затіненої моделлю танка, настільки малі, що навіть використання РПМ на всій поверхні моделі танка не приводить до бажаних значень контрасту для даної підстильної поверхні. У той же час покриття 25 з 141 ділянок поверхні приводить до того, що середня ЕПР моделі танка знижується до рівня ЕПР повністю покритою моделі. В якості ілюстрації

на Рис. 12-15 наведені варіанти оптимального розміщення РПМ для різних типів підстильних поверхонь і діапазонів азимутів зондування при використанні 25 покритих ділянок. Покриті ділянки позначені світлим фоном і окреслені лінією.

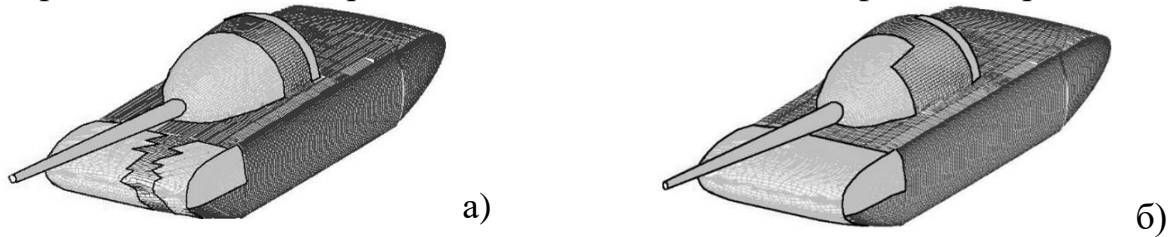


Рис. 12 – Оптимальне розміщення РПМ для діапазону азимутів $-5^{\circ} \dots +5^{\circ}$ (а – степ; б – бетон)

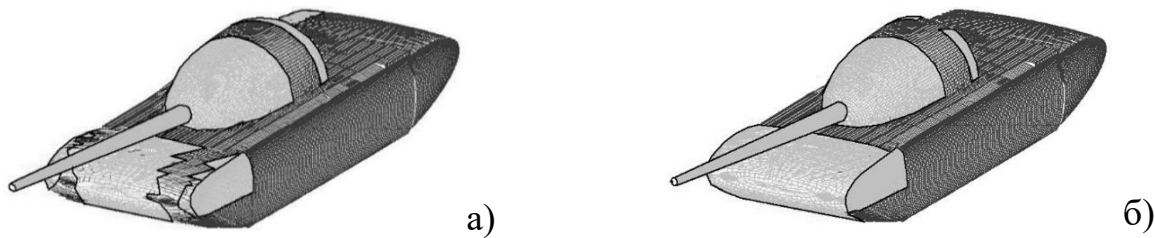


Рис. 13 – Оптимальне розміщення РПМ для діапазону азимутів $-10^{\circ} \dots +10^{\circ}$ (а – степ; б – бетон)

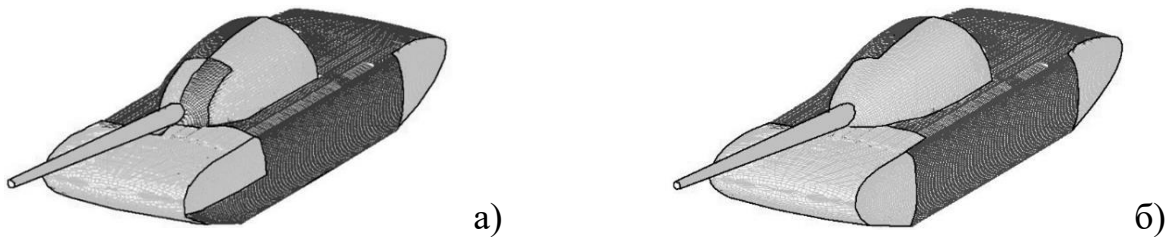


Рис. 14 – Оптимальне розміщення РПМ для діапазону азимутів $+40^{\circ} \dots +50^{\circ}$ (а – степ; б – бетон)

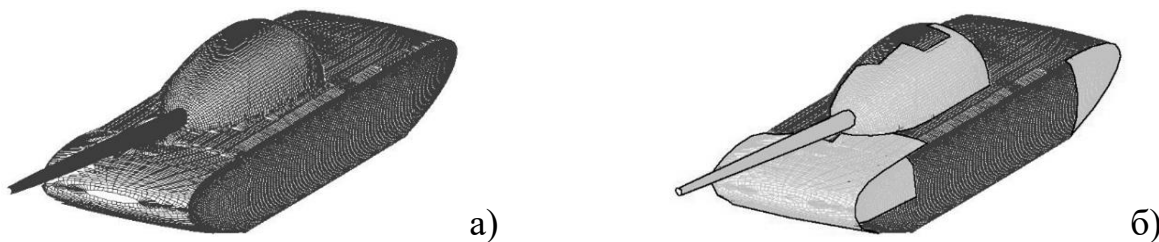


Рис. 15. Оптимальне розміщення РПМ для діапазону азимутів $+35^{\circ} \dots +55^{\circ}$ (а – степ; б – бетон)

Аналіз рис. 12-15 в сукупності з даними табл. 2 показує дві цікаві тенденції. Якщо підстильна поверхня має низький рівень зворотного розсіювання (як у випадку з бетоном), підбір оптимального розміщення РПМ зводиться до покриття 25 ділянок поверхні моделі танка з найвищими значеннями ЕПР в ідеально провідному варіанті. При цьому досягається рівень ЕПР повністю покритого танка. Якщо підстильна поверхня має помітний рівень зворотного розсіювання (як у випадку зі степом), підбір оптимального розміщення РПМ може приводити до можливості неповного

використання розглянутих 25 ділянок поверхні і досить химерним контурам вкритих РПМ ділянок на поверхні танка. Більш того, виявляються випадки (діапазон азимутів $+35^\circ \dots +55^\circ$, рис. 15 а), коли немає необхідності в покритті танка. В цьому випадку ЕПР ідеально провідної моделі близька до ЕПР затіненого ділянки підстильної поверхні.

Для підстильної поверхні з помітним рівнем зворотного розсіювання розглянуто вплив зниження кількості ділянок, що укриваються РПМ, на рівень контрасту моделі танка, розміщеного в степу. За допомогою описаної вище процедури було показано, що зниження кількості покритих ділянок дозволяє отримувати хороші результати по зниженню контрастності моделі танка при мінімальній кількості використаного РПМ. У таблиці 3 і на рис 16 представлені результати розрахунків для степу як підстильної поверхні в діапазоні азимутів зондування $+40^\circ \dots +50^\circ$ для різної кількості ділянок поверхні, за якими проводиться оптимізація: 7, 10 і 25 ділянок. Для цього діапазону азимутів зондування середня ЕПР затіненого ділянки підстильної поверхні $\sigma_g = 2.27 \text{ м}^2$, ЕПР повністю покритого танка $\sigma_{abs} = 0.087 \text{ м}^2$, ЕПР ідеально провідної моделі танка $\sigma_{pc} = 2.71 \text{ м}^2$.

Таблиця 3

Результати розрахунку ЕПР моделі танка для різної кількості ділянок поверхні, що беруть участь в оптимізації (діапазон азимутів зондування $+40^\circ \dots +50^\circ$, горизонтальна поляризація)

Кількість ділянок оптимізації	$\sigma_{opt}, \text{м}^2$	$ \sigma_{opt} - \sigma_g , \text{м}^2$
7	2.405923	0.134241
10	2.380756	0.109074
25	2.360677	0.088995

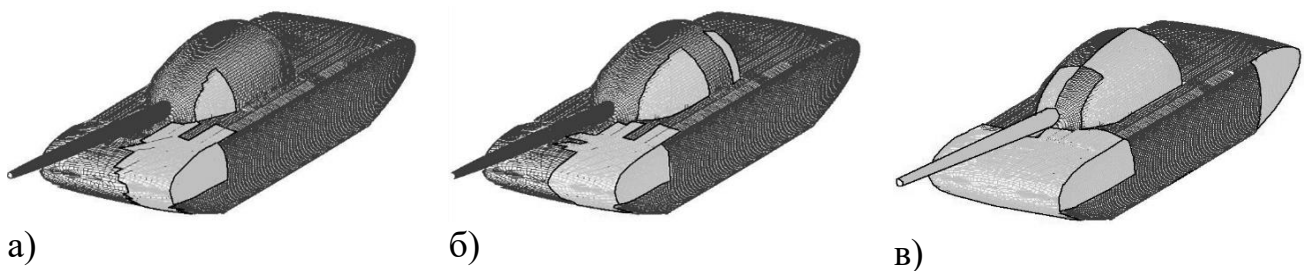


Рис. 16 - Оптимальне розміщення РПМ для діапазону азимутів $+40^\circ \dots +50^\circ$ при різній кількості ділянок оптимізації (а - 7, б - 10, в - 25)

Аналіз результатів, представлених в табл.3, показує, що зниження кількості ділянок, що покриваються, з 25 до 7 не приводить до суттєвих змін ЕПР танка. Розбіжності в значеннях ЕПР не перевищують 2 відсотків. При цьому, судячи з рис. 16, вдається істотно знизити кількість використовуваного РПМ для досягнення прийнятного рівня контрасту моделі танка на такій підстильній поверхні.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання розробки методики що дозволяє отримати дані про радіолокаційні характеристики наземних об'єктів складної форми шляхом вимірювання відбиття від локальних ділянок їх поверхні у ближній зоні.

На підставі цього було зроблено такі висновки.

1. Проведено аналіз експериментальних та теоретичних методів оцінки розсіювання електромагнітних хвиль на наземних об'єктах складної форми та зроблено висновок про необхідність дослідження (на основі методу декомпозиції) вторинного випромінювання наземних об'єктів складної форми. Такі дослідження дозволять виділити ділянки найбільш сильного розсіювання, на яких потрібно застосовувати РПМ для зниження радіолокаційної помітності об'єктів, що розглядаються, в цілому.

2. Наведено декомпозиційну методику розрахунку вторинного випромінювання наземного об'єкту. Основна ідея методики полягає в тому, щоб розділити об'єкт на окремі фрагменти та провести вимірювання для кожного фрагмента в зоні ближнього поля окремо. Перевагою цієї методики є її доступність і простота у порівнянні з відомими методами вимірювання ЕПР в дальній зоні.

3. Проведено розрахунок вторинного випромінювання моделі ТБКМ декомпозиційною методикою. При цьому було застосовано програмне забезпечення CST microwave studio. Показано, що ділянки поверхні об'єкту з найбільшим значенням ЕПР знаходяться при зондуванні в горизонтальній площині в напрямку корми та по центру спереду. При зондуванні з бортів ділянки найбільш сильного вторинного розсіювання розташовано в нижній частині моделі.

4. Проведено верифікацію теоретичних розрахунків шляхом порівняння місць розташування ділянок з найбільшими значеннями ЕПР, які отримано експериментально та за допомогою числового моделювання. Порівняння місць розташування найбільш відбиваючих ділянок поверхні показало співпадання місць, отриманих у експерименті і розрахованих теоретично, на 75%.

5. На основі проведених досліджень було зроблено висновок, що достатньо враховувати лише розташування 20% найбільш відбиваючих ділянок поверхні, що може дозволяє при використанні РПМ, знизити ЕПР всього об'єкту в 2 рази.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Масловский А. А.,** Легенький М. Н. Об оценке заметности радиолокационных целей, расположенных на подстилающей поверхности // Вісн. Харків. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2014. № 1115. Вип. 24. С. 14–22. *(Особистий внесок здобувача: проведення статистичної обробки результатів розрахунку дифракції хвиль на об'єктах складної форми, розташованих на підстильній поверхні, аналіз результатів числових розрахунків, робота над текстом статті).*

2. **Масловський О. А.,** Легенький М. М., Антюфєєва М. С. Оцінка кроку для розрахунку (вимірювання) діаграми зворотного розсіювання об'єктів складної

форми // Вісн. Харків. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2016. Вип. 25. С. 74–79. *(Особистий внесок здобувача: проведення статистичної обробки результатів розрахунку дифракції хвиль на об'єктах складної форми, числові розрахунки, створення моделі об'єкту складної форми, робота над текстом статті).*

3. **Масловский А. А.**, Легенький М. Н., Демченко А. А., Колчигин Н. Н. Частичная маскировка объектов сложной формы с помощью радиопоглощающих материалов // Вісн. Харків. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2017. Вип. 27. С. 3–8. *(Особистий внесок здобувача: створення моделі об'єкту складної форми, проведення числових розрахунків, аналіз результатів, робота над текстом статті).*

Наукові праці у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз:

4. Legenkiy M. N., **Maslovskiy A. A.**, Khrychev V. S. Processing RCS Distribution for Complex Shape Objects // Telecommunications and Radio Engineering. Kharkiv, 2016. Vol. 75, Iss. 20. P. 1825–1836. *(Особистий внесок здобувача: створення моделі об'єкту складної форми, розрахунок розсіювання електромагнітних хвиль на цьому об'єкті, робота над текстом статті).* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

5. Legenkiy M. N., Kolchigin N. N., **Maslovskiy A. A.** Simulation of measuring RCS of complex scatterers by the decomposition method // Telecommunications and Radio Engineering. Kharkiv, 2017. Vol. 76, Iss. 12. P. 1111–1120. *(Особистий внесок здобувача: створення моделі об'єкту складної форми, проведення числових розрахунків за допомогою декомпозиційної методики, робота над текстом статті).* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

6. Kolchigin N., Legenkiy M., **Maslovskiy A.**, Demchenko A., Vinnichenko S., Vasilchenko I., Rolenko S., Devyatilov Yu., Glebov V. Decomposition Method For Determining The High Reflected Sections Of A Complex Object Surface // Telecommunications and Radio Engineering. Kharkiv, 2018. Vol. 77, Iss. 11. P. 945–956. *(Особистий внесок здобувача: створення моделі об'єкту складної форми, проведення числових розрахунків, допомога в проведенні натурних вимірювань, аналіз результатів, робота над текстом статті).* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

7. **Maslovskiy A.**, Vasylets V., Nechitaylo S., Sukharevsky O. Method Of Radar Masking Of The Ground Based Military Equipment Objects // Telecommunications and Radio Engineering. Kharkiv, 2019. Vol. 78, №. 1. P. 47–58. *(Особистий внесок здобувача: створення моделі об'єкту, участь в обговоренні та аналізі результатів, робота над текстом статті).* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Наукові праці у фахових закордонних виданнях:

8. Antyufeyeva M. S., Butrym A. Y., Kolchigin N. N., Legenkiy M. N., **Maslovskiy A. A.**, Osinovy G. G. Specific RCS for describing the scattering characteristic of complex shape objects // Progress In Electromagnetics Research M. 2016. Vol. 52. P. 191–200. *(Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків,*

створення моделі об'єкту складної форми, робота над текстом статті). (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, Web of Science).

Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:

9. **Maslovskiy A. A.**, Legenkiy M. N. Geometrical techniques for reducing radar targets detectability // 14th Kharkiv Young Scientists Conference On Radiophysics, Electronics, Photonics And Biophysics, (14–17 Oct. 2014). Kharkov, 2014. (Особистий внесок здобувача: створення моделі об'єкту, проведення числових розрахунків, робота над текстом).

10. **Maslovskiy A. A.**, Legenkiy M. N. Analysis of Geometrical Techniques for Reducing Radar Detectability of On-Ground Targets // YSF'2015: International young scientist forum on applied physics, (29 Sept. – 2 Oct. 2015). Dnipropetrovsk, 2015. P. 1–4. (Особистий внесок здобувача: створення моделі об'єкту складної форми, проведення числових розрахунків, аналіз результатів, робота над текстом). (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, Web of Science).

11. **Maslovskiy A.**, Legenkiy M. Antyufeyeva M. BSP Step for Complex Target RCS Measuring or Calculation // Msmw'2016: The 9th International Kharkov Symposium On Physics And Engineering Of Microwaves, Millimeter And Submillimeter Waves, (20–24 June 2016). Kharkiv, 2016. (Особистий внесок здобувача: створення моделі об'єкту складної форми, проведення числових розрахунків, проведення статистичної обробки отриманих даних, робота над текстом). (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, Web of Science).

12. **Maslovskiy A.**, Legenkiy M., Antyufeyeva M. BSP Step for On-Ground Targets RCS Measuring or Calculation // MMET'2016: Proceedings of the conference Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. (5–7 July 2016). Lviv, 2016. P. 306–309. (Особистий внесок здобувача: створення моделі наземного об'єкту складної форми, проведення числових розрахунків, проведення статистичної обробки отриманих даних, робота над текстом). (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, Web of Science).

13. Antyufeyeva M.S., Legenkiy M.N., **Maslovskiy A.A.** Influence of Background Surface on Backscattering Pattern of Complex Shape Object // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. (5–8 Sept. 2016). Odessa, 2016. P. 179–182. (Особистий внесок здобувача: створення моделі наземного об'єкту складної форми, проведення числових розрахунків, аналіз даних, робота над текстом). (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, Web of Science).

14. **Maslovskiy A. A.**, Legenkiy M. N., Kolchigin N. N. Decompsition method for complex target RCS measuring // **UKRCON: IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering**, (29 May – 2 June 2017). Kyiv, 2017. P. 156–159. (Особистий внесок здобувача: створення моделі об'єкту складної форми, проведення числових розрахунків за допомогою декомпозиційного методу, робота над текстом). (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, Web of Science).

15. Legenkiy M., **Maslovskiy A.** Specific RCS for On-Ground Radiolocation Target // MRRS-2017: IEEE Microwave, Radar and Remote Sensing Symposium, (29–31 Aug. 2017). Kyiv, 2017. P. 211–214. *(Особистий внесок здобувача: створення моделі наземного об'єкту складної форми, проведення числових розрахунків, робота над текстом).* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, Web of Science).

16. **Maslovskiy A.**, Legenkiy M. Experimental Measuring of Bright Spots on Complex Shape Object Surface with Decomposition Method // 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, (4–7 Sept. 2018). Odessa, 2018. P. 181–184. *(Особистий внесок здобувача: створення моделі об'єкту складної форми, проведення числових розрахунків декомпозиційним методом, порівняння даних числового моделювання та натурних вимірювань, робота над текстом).* (Видання входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, Web of Science).

Патенти України за темою дисертації:

17. Спосіб вимірювання ефективної площі розсіювання великогабаритних об'єктів в ближній зоні: пат. 119169, G01S 13/00. Україна. № u201703910 ; заявл. 20.04.2017; опубл. 11.09.2017. Бюл. № 17/2017. 5 с. *(Особистий внесок здобувача: створення моделі об'єкту складної форми, проведення числових розрахунків, створення ілюстрацій до заявки).*

18. Спосіб визначення ефективної площі розсіювання великогабаритних об'єктів, розташованих на підстильній поверхні : пат. 123925, G01S 7/52 Україна. № u201710180 ; заявл. 23.10.2017 ; опубл. 12.03.2018. Бюл. № 5/2018. 5 с. *(Особистий внесок здобувача: створення моделі об'єкту складної форми, проведення числових розрахунків, створення ілюстрацій до заявки).*

19. Спосіб маскування стаціонарних і рухомих об'єктів складної форми за допомогою радіопоглинаючих матеріалів: пат. 125605, F41H 3/00. Україна. № u201800452; заявл. 17.01.2018; опубл. 10.05.2018. Бюл. № 9/2018. 8 с. *(Особистий внесок здобувача: створення моделі об'єкту складної форми, проведення числових розрахунків, створення ілюстрацій до заявки).*

АНОТАЦІЯ

Масловський О. А. Радіолокаційні характеристики наземних об'єктів складної форми на основі вимірювань відбиття від локальних ділянок – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 Радіофізика. Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2020.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню актуального наукового завдання вдосконалення методів розрахунку та вимірювання радіолокаційних характеристик об'єктів складної форми. Досліджено характеристики розсіювання електромагнітних хвиль на об'єктах, розташованих на підстильній поверхні.

На базі результатів радіолокаційного зондування, отриманих в ближній зоні об'єкту, наведено декомпозиційну методику розрахунку вторинного випромінювання наземного об'єкту. Проведено розрахунок вторинного випромінювання моделі тактичної броньованої колісної машини (ТБКМ) декомпозиційною методикою.

Проведена верифікація теоретичних розрахунків шляхом порівняння місць розташування ділянок з найбільшими значеннями ЕПР, які отримано експериментально, та за допомогою числового моделювання. Порівняння місць розташування найбільш відбиваючих ділянок поверхні показало збіг місць, отриманих у експерименті і розрахованих теоретично на 75%.

У дисертаційній роботі розроблено метод часткового покриття об'єкта ("камуфляж") радіопоглинаючим матеріалом таким чином, що величина середньої ЕПР об'єкта в заданому кутовому діапазоні опромінення була максимально близька до середньої ЕПР "затіненої" об'єктом ділянки підстильної (фоновой) поверхні. Таким чином розроблений метод дозволяє зробити об'єкт максимально непомітним ("неконтрастним") для засобів радіолокаційного спостереження.

Ключові слова: електромагнітні хвилі, ефективна поверхня розсіювання, натурні вимірювання, числове моделювання, дальня зона, ближня зона, розсіювання електромагнітних хвиль, радіолокація, радіолокаційна помітність, радіопоглинаючі матеріали.

АННОТАЦИЯ

Масловский А. А. Радиолокационные характеристики наземных объектов сложной формы на основе измерения отражения от локальных участков. Рукопись.

Диссертация на получение научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 Радиофизика. Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2020.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной проблемы усовершенствования методов расчета и измерения радиолокационных характеристик объектов сложной формы.

На основании результатов радиолокационного зондирования, полученных в ближней зоне объекта, в работе представлена декомпозиционная методика расчета вторичного излучения наземного объекта. Проведен расчет вторичного излучения модели тактической бронированной колёсной машины (ТБKM) декомпозиционной методикой. Проведена верификация теоретических расчетов путем сравнения мест расположения участков поверхности объекта с наибольшими значениями ЭПР, полученными экспериментально и с помощью численного моделирования. Сравнение мест расположения показало совпадение мест, полученных экспериментально и теоретически на 75%.

В диссертационной работе разработан метод частичного покрытия объекта («камуфляж») радиопоглощающим материалом таким образом, что величина средней ЭПР объекта в заданном угловом диапазоне облучения была максимально близка к средней ЭПР «затененного» объектом участка подстилающей (фоновой) поверхности. Таким образом разработанный метод позволяет сделать объект максимально незаметным («не контрастным») для средств обнаружения.

Ключевые слова: электромагнитные волны, эффективная поверхность рассеивания, натурные измерения, численное моделирование, дальняя зона, ближняя

зона, рассеивание электромагнитных волн, радиолокация, радиолокационная заметность, радиопоглощающие материалы.

ABSTRACT

***Maslovskiy. O. Methods of radar characteristics estimation of complex form onground objects, based on measured reflections from local areas* -Manuscript.**

Thesis for a Candidate Degree in physical and mathematical sciences. Speciality 01.04.03 Radiophysics V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to solving the actual scientific problem of improving the method of calculation and measurement of radar characteristics of a complex shape object. The characteristics of electromagnetic waves scattering on the objects, which are located on the underlying surface were investigated.

In dissertation the analysis of experimental and theoretical methods for secondary radiation estimation of complex form ground objects is carried out. Existing methods of measuring of the radar cross section in a far zone are considered. A brief analysis of technical means for measuring radar characteristics of objects with complex surface is given. On the basis of the review of the advantages and disadvantages of field measurements of the radar cross section of complex objects, it was concluded that there is a need to study secondary radiation of complex ground object on the basis of a decomposition method.

Based on the research carried out in the dissertation it is possible, from RCS calculations with a big angle step, to drive conclusions about the average RCS for the object and to determine the confidence intervals in which this average value with a given probability will lie. In particular, we can conclude that in order to obtain a relative error no greater than $\sim 20\%$ for each of the models analysed in the work should choose an angle step of not more than 3° .

Based on the results obtained in the near-field of the object, a decomposition method for calculating the secondary radiation of the ground object is presented. The calculation of secondary radiation of a tactical armored wheeled car model (TAWC) has been calculated by decomposition method. The verification of theoretical calculations was performed by comparing the locations of the areas with the largest RCS values, which were obtained experimentally, and by means of numerical simulation. Comparison of the locations of the most reflective areas of the surface showed a coincidence of the locations obtained in the experiment and calculated theoretically, by 75%.

In the dissertation work the method of partial coverage of the object ("camouflage") was developed with the radio-absorbing material in such a way that the value of the average RCS of the object in the given angle of irradiation was as close as possible to the average RCS of the "shaded" by the object area of the underlying (background) surface. Thus, the developed method makes it possible to make the object as completely invisible ("non-contrast") for radar surveillance devices.

Key words: electromagnetic waves, radio cross section, direct measurements, numerical simulation, far field, near field, scattering of electromagnetic waves, radar, radar visibility, radioabsorbing materials.